

Entwicklung einer Simulationsmethodik zur schnellen Dimensionierung komplexer Materialflusssysteme

Development of a simulation method for rapid dimensioning of complex material flow systems

Svenja Hilbrich¹
Harald Köck²
Johannes Hinckeldeyn¹
Jochen Kreuzfeldt¹

¹Institut für Technische Logistik
Technische Universität Hamburg

²SSI Schäfer Automation GmbH

Bei der Planung und Entwicklung intralogistischer Systeme spielt die Simulation eine wichtige Rolle. Insbesondere bei der Auslegung und Dimensionierung komplexer Kommissionier-, Lager- und Fördertechnik führen statische Berechnungen und Heuristiken oftmals nicht zu ausreichend guten Ergebnissen. Der Grund dafür liegt in der fehlenden Berücksichtigung dynamischer Effekte, wie auftragsbedingte Schwankungen, und von verketteten Prozessen. Die bisher praktizierte Lösung, ereignisdiskrete Simulationsmodelle einzusetzen, benötigt jedoch erheblichen Ressourcenaufwand. Deshalb wird in diesem Beitrag ein Konzept für eine progressive Simulationsmethodik vorgestellt, welche dynamische Effekte berücksichtigt bei signifikant geringerem Modellierungsaufwand. Dafür werden die Anforderungen an die neue Simulationsmethode systematisch erörtert und das theoretische Konzept und der Implementierungsansatz ausführlich dargestellt.

[Schlüsselwörter: Simulation, Materialflusstechnik, Dimensionierung, Planung]

Simulation models play an important role in the planning and development in intralogistics. Especially the layout and dimensioning of order picking processes, warehouses and handling engineering is often based on static estimations and rules of thumb. This leads to inferior planning results, because dynamic effects, such as peaks of orders, and sequential process steps are often neglected. The most common solution at the moment are event discrete simulation models, which create a significant workload for planning departments in logistical companies. Therefore, this article presents a concept for a progressive simulation method. This new approach enables the consideration of dynamic effects without an increase of workload. This contribution depicts the underlying requirements, the resulting theoretical concept and

the implementation approach of the new progressive simulation methodology.

[Keywords: Simulation, material flow, dimensioning, planning]

1 EINLEITUNG

Simulation war und ist ein populäres Werkzeug zum Planen und Dimensionieren in der Logistik. Bereits in den 1980 und 1990 Jahren war Simulation sehr beliebt bei der Untersuchung von Produktions- und Logistikproblemen [PFAS99]. Diese Entwicklung hat sich auch in den Jahren danach weiter fortgesetzt, allerdings mit einer wachsenden Diversifizierung existierender Simulationsansätze, wie [JENSY10] in einer ausgedehnten Studie herausfanden. Dabei wurden weitere Simulationsansätze entwickelt, um zusätzliche Problemfelder in der Produktion und Logistik für die Simulation zugänglich zu machen. Ein weiteres Indiz dafür ist die seit 1968 jährlich stattfindende Winter Simulation Conference, bei der zuletzt 2016 insgesamt 356 Beiträge vorgestellt wurden, 27 davon zu Themen der Logistik [Win17]. Unter Simulation wird das „Nachbilden eines Systems mit seinen dynamischen Prozessen in einem experimentierbaren Modell, um zu Erkenntnissen zu gelangen, die auf die Wirklichkeit übertragbar sind“ [VDI14] verstanden. Dabei besitzen Simulationsmodelle besondere Stärken in der Planung und Optimierung logistischer Systeme [Ele10]:

- Neue Ideen können getestet werden ohne in reale Logistiksysteme einzugreifen.
- Alternative Lösungen können miteinander verglichen und bewertet werden.
- Entscheidungen können auf der Basis quantitativer Daten getroffen werden.

- Visualisierungswerkzeuge können Planungen bildlich darstellen.

Dies hat dazu geführt, dass Simulationsmodelle zur Untersuchung logistischer Systeme heute eine große Verbreitung in Wissenschaft und Praxis gefunden haben.

2 STAND DER TECHNIK

Für die Modellierung von Logistik- und Produktionssystemen wurden bisher drei Arten von Simulationsmethoden eingesetzt [JK16]:

1. **Statische Simulationsmodelle** basieren auf einem System aus Differentialgleichungen zur Beschreibung logistischer Zusammenhänge. Eine bekannte Methodik ist der sog. Systems Dynamics Ansatz von Jay Forrester [For91]. Die zu beschreibenden Probleme müssen dabei ein stetiges Verhalten aufweisen und sind meist langfristiger Natur. Die Anwendungsfelder kontinuierlicher Simulationsmodelle in der Logistik liegen beispielsweise in der Simulation ganzer Supply Chains [AA00]. Entsprechende Simulationsmodelle können vergleichsweise schnell erstellt werden. Nachteile dieser Simulationsmethode sind jedoch die Festlegung auf Fragestellungen, die sich auch durch Differentialgleichungen abbilden lassen, die Vernachlässigung von dynamischen Effekten und einzelnen Ereignissen, wie beispielsweise auftragsbedingte Schwankungen und die fehlende Abbildung verketteter Prozessstufen. Für operative und detaillierte Fragestellungen ist die erzielbare Genauigkeit deshalb oft zu gering.
2. **Ereignisdiskrete Simulationsmodelle** sind in der Lage solche spezifischen Ereignisse abzubilden. Der Zustand eines Simulationsmodells wird dann immer beim Auftreten eines solchen Ereignisses neu berechnet. Damit eignen sich ereignisdiskrete Simulationsmodelle sehr gut für die Modellierung operativer Fragestellungen, wie z.B. Engpassanalysen [Hös01]. Diese Simulationsmodelle erreichen meist eine gute Genauigkeit, benötigen dazu jedoch oft eine umfassende und genaue Datenbasis und Modellierung. Der Erstellungsaufwand für solche Simulationsmodelle ist deshalb in vielen Fällen hoch.
3. **Multi-Agenten Systeme** repräsentieren Simulationsmodelle, die Abläufe durch die Interaktionen von autonomen Agenten abbilden, die jeweils ihre eigenen Ziele verfolgen. So soll das Zusammenspiel verschiedener Akteure abgebildet werden. Die zu untersuchenden Fragestellungen sind oftmals grundsätzlicher Natur und der Einsatz von Multi-Agenten Simulationen findet meistens in

der Forschung statt. Ein Beispiel ist die Untersuchung von Koordinationsmechanismen in komplexen und instabilen Produktionsprozessen [MR10]. Für praktische Probleme der operativen Logistikplanung, z.B. Dimensionierung von Fördertechnik, spielen Multi-Agenten Systeme keine besondere Rolle.

In der Praxis werden für die Planung von Logistik- und Produktionssystemen heute hauptsächlich statische und ereignisdiskrete Simulationsansätze eingesetzt.

Für einen umfassenden Einsatz in der Planung von Materialflusselementen, wie Förder-, Lager- und Kommissioniertechnik, bedürfen diese Ansätze jedoch noch weiterer Verbesserungen. Wie oben bereits ausgeführt, berücksichtigen statische Simulationsmodelle nicht ausreichend dynamische Effekte, wie zum Beispiel das dynamische Auftreten von Warteschlangen oder Auftragsspitzen, so dass die darauf aufbauende Planung von falschen Voraussetzungen ausgeht. Die ereignisdiskrete Simulation kann zwar diese Dynamiken abbilden, erfordert jedoch einen erheblichen Aufwand an Modellierung. Dies führt dazu, dass meist nur umfangreiche Projekte mit einer Simulation geprüft werden, obwohl auch mittlere und kleine Logistiksysteme gut mit Simulationen modelliert und geprüft werden könnten. Ziel dieses Beitrages ist daher die Darstellung der Entwicklung einer allgemeingültigen Simulationsmethodik für alle Materialflusselemente, die schnell und effizient, ähnlich einer statischen Simulation, für unterschiedliche Projekte eingesetzt werden kann und trotzdem dynamische Effekte abbildet und so eine mit ereignisdiskreten Simulationen annähernd vergleichbare Genauigkeit erreicht. Die neue Simulationsmethode wird in enger Zusammenarbeit mit der SSI Schäfer Automation GmbH entwickelt und getestet.

Der nachfolgende Beitrag ist wie folgt aufgebaut: Im nächsten Abschnitt werden die Anforderungen an die neue Simulationsmethode abgeleitet. Anschließend wird das theoretische Konzept vorgestellt. Abschnitt 5 befasst sich mit der Implementierung der Simulation. Der Beitrag schließt mit einem Fazit und einem Ausblick auf zukünftige Arbeitsschritte.

3 ANFORDERUNGEN AN EINE NEUE SIMULATIONSMETHODE

Der neu zu entwickelnde Ansatz wird als progressive Simulation logistischer Systeme bezeichnet. Damit soll die grundsätzliche Idee zum Ausdruck gebracht werden, dass die Simulation im fortschreitenden Zeitablauf nur bestimmte Ereignisse berechnet, im Gegensatz zur ereignisdiskreten Simulation, die alle Ereignisse im Prozessablauf betrachtet. Daraus ergeben sich zwei Haupteigenschaften der neuen Simulationsmethodik - Schnelligkeit und Modellierungsflexibilität. Als Schnelligkeit wird dabei die Fähigkeit verstanden, die Zeit zur Modellierung und Simulation

logistischer Problemstellungen zu reduzieren, so dass der Aufwand im Vergleich zu der Erstellung ereignisdiskreter Simulationsmodelle signifikant gesenkt werden kann. Modellierungsflexibilität hingegen beschreibt die einfache Anpassungsfähigkeit der verwendeten Simulationsbausteine und –strukturen an unterschiedliche intralogistische Lösungen aus den Bereichen Lagern, Fördern, Kommissionieren und Sortieren. Um diese beiden Haupteigenschaften zu erreichen, wurden zunächst die Anforderungen an die neue Simulationsmethodik formuliert.

Insgesamt wurden sechs grundlegende Anforderungen für eine progressive Simulationsmethodik identifiziert:

1. **Geringer Modellierungsaufwand:** Um die Forderung nach schnell verfügbaren Ergebnissen zu erfüllen, wird die progressive Simulationsmethodik die Modellierung einfach gestalten. Damit soll der Modellierungsaufwand zu Beginn jeder Simulation reduziert werden, insbesondere im Vergleich mit ereignisdiskreten Verfahren.
2. **Generischer Modellierungsansatz verschiedener Materialflusselemente:** Um den Modellierungsaufwand zu reduzieren und gleichzeitig möglichst flexibel unterschiedliche Materialflusselemente mit verschiedenen Funktionen zu simulieren, wird ein generischer Ansatz zur Modellierung entwickelt. Dieser Modellierungsansatz soll möglichst einfach das zeitliche Verhalten der Materialflusselemente abbilden können und dabei flexibel genug sein, um Elemente der Förder-, Lager-, Kommissionier- und Sortiertechnik einheitlich beschreiben zu können.
3. **Schnelle Simulationsläufe:** Auch nach der Modellierung soll die progressive Simulationsmethodik auf eine hohe Geschwindigkeit ausgelegt werden. Dazu müssen die durchgeführten Simulationsläufe eine kurze Laufzeit haben.
4. **Hinreichende Genauigkeit:** Trotz ihrer Schnelligkeit müssen die Ergebnisse einer progressiven Simulation hinreichend genau sein. Dies bedeutet, dass die Ergebnisse einer progressiven Simulation eines intralogistischen Systems nur geringfügig von den Ergebnissen einer ereignisdiskreten Simulation abweichen. In jedem Fall soll die Genauigkeit höher sein als die einer statischen Simulation.
5. **Verarbeitung großer Datenmengen:** Die neue Simulationsmethode soll in der Lage sein, umfangreiche Simulationsmodelle mit vielen Objekten und Informationen in kurzer Zeit mehrfach zu verarbeiten. Damit soll eine Art Experimentalplanung und –steuerung geschaffen werden, die

mehrere Testläufe als Stapel mit variierten Parametern automatisch verarbeitet ohne das Eingriffe des Benutzers zwischendurch notwendig werden.

Um diese Anforderungen erfüllen zu können, wurden einerseits theoretische Konzepte (Abschnitt 4) und Lösungsansätze zur Software-Implementierung (Abschnitt 5) entwickelt, die nachfolgend detailliert dargestellt werden.

4 THEORETISCHES KONZEPT

Das theoretische Konzept der progressiven Simulation ist auf drei Säulen aufgebaut:

- Einsatz eines Black-Box-Ansatzes
- Modellierung von Materialflusselementen mithilfe generischer Module
- Skalierbarkeit der Simulationsmodelle

Diese drei Säulen werden nachfolgend dargestellt.

4.1 BLACK-BOX-ANSATZ

Um eine effiziente und schnelle Simulation bei hinreichender Genauigkeit zu gewährleisten wird ein Black-Box-Ansatz für die Modellierung der Materialflusselemente gewählt. Der grundsätzliche Vorteil eines solchen Ansatzes ist die Betrachtung von Objekten ohne Nachbildung aller internen Prozesse, so dass die vorhandene Komplexität reduziert werden kann [Dek15]. Dabei wird das zu simulierende Materialflusssystem in mehrere Abschnitte (sogenannte Module) unterteilt. Diese Module besitzen eine definierte Grenze gegenüber ihrer Umwelt. Die Beziehungen zur Umwelt werden über bestimmte Ein- und Ausgänge definiert. Die Beziehung zwischen diesen Ein- und Ausgang wird durch eine Übertragungsfunktion modelliert. So kann die interne Komplexität des Moduls reduziert und die Modellierung vereinfacht werden.

Ein Beispiel des Block-Box-Ansatzes ist in Abbildung 1 dargestellt. Dort soll ein Rollenförderer modelliert werden, der über mehrere Eingänge Ladungsträger (rot) erhalten kann. Diese werden über den Rollenförderer nach rechts zum Ausgang transportiert. Der Rollenförderer wird für die Modellierung derart gedanklich zerlegt, dass er anschließend aus zwei geraden Stücken und einem Zusammenführungsabschnitt in der Mitte besteht (Module A, B und C in Abbildung 1 Mitte). Jedes Modul wird durch eine Black-Box repräsentiert. Dabei wird die Komplexität der einzelnen Module reduziert, indem der Eingangs- und der Ausgangszeitpunkt eines logistischen Objektes (z.B. eines Auftrages oder eines Behälters) betrachtet werden. Diese Beziehung zwischen Ein- und Ausgang ist daher rein zeitlicher Natur. Andere Aspekte werden nicht berücksichtigt, wie z.B. Energie- oder Flächenverbrauch. Das bedeutet, die Übertragungsfunktion berechnet die Zeitpunkte zu denen

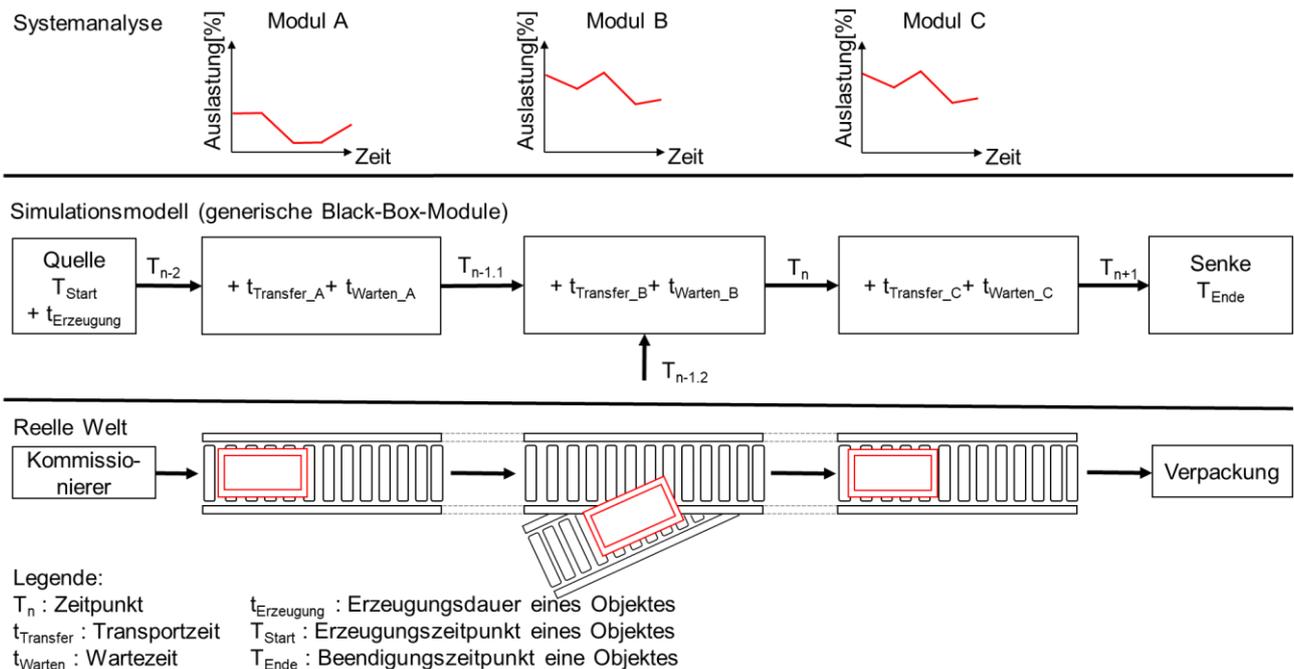


Abbildung 1. Beispielhafte Analyse verketteter, automatisierter Materialflusselemente.

ein Ladungsträger ein Modul betritt und wieder verlässt. Die Übertragungsfunktion setzt sich daher aus einer Transport bzw. Bearbeitungszeit t_{Transfer} und einer gegebenenfalls auftretenden Wartezeit t_{Warten} zusammen. So kann sich die Berechnung der progressiven Simulation auf die Zeitpunkte an den Grenzen eines Moduls konzentrieren. Dazwischenliegende Ereignisse werden nicht berücksichtigt. Die Ergebnisse der berechneten Ereignisse werden alle für eine spätere Analyse gespeichert. Dadurch können dynamische Effekte berücksichtigt werden, die auf der Ebene der Systemanalyse (Abbildung 1 oben) über den Zeitablauf und für verschiedene Simulationsszenarien aggregiert werden können. Durch die Konzentration auf zeitliche Beziehungen wird ein schlankes Simulationsmodell bei gleichzeitiger Berücksichtigung dynamischer Effekte geschaffen.

4.2 GENERISCHE MODULE ZUR MODELLIERUNG VON MATERIALFLUSSELEMENTEN

Die zweite Säule der progressiven Simulation ist die Verwendung generischer Module zur Modellierung unterschiedlicher Materialflusselemente. Diese Module sind äquivalent zu den in Abschnitt 4.1 dargestellten Black Boxes und repräsentieren beispielsweise Bestandteile eines Rollenförderers. Grundsätzlich werden drei Typen von Modulen unterschieden. Erstens gibt es Quellen, die in der Lage sind neue logistische Objekte zu erzeugen. Als logistische Objekte sind bewegliche Elemente zu verstehen, die sich während eines Prozesses durch das logistische System bewegen, z.B. Transportbehälter. Zweitens, Materialflussbausteine bilden logistische Prozesse ab, wie Transportieren, Zusammenführen, Speichern oder Sortieren. Die dritte

und letzte Modultyp sind Senken, in denen Objekte vernichtet werden bzw. das Simulationsmodell verlassen. Quellen und Senken stellen hier die Schnittstellen zur Außenwelt eines gesamten, modellierten Logistiksystems dar. Beispiele für alle drei Modultypen sind in Abbildung 1 zu finden. In der reellen Welt erhält Modul A des Rollenförderers logistische Objekte (hier Transportkisten) aus einer Quelle. Eine solche Quelle könnte zum Beispiel ein menschlicher Kommissionierer in einem Lager sein. Diese Quelle wird ebenfalls durch ein Modul repräsentiert, das den Erzeugungszeitpunkt T_{Start} eines Objektes anhand seiner Erzeugungsdauer $t_{\text{Erzeugung}}$ berechnet. Die Senke befindet sich am Ende des Rollenförderers. Diese ist gleichzeitig das Ende des Simulationsmodells und der weitere Verlauf der logistischen Objekte wird nicht mehr verfolgt. In diesem Fall entspricht dies einem Verpackungsarbeitsplatz. Das zu simulierende System endet dort und ankommende Objekte werden dort vernichtet. Der Beendigungszeitpunkt t_{Ende} eines Objektes wird dort registriert. Zusammen bilden diese drei Modultypen die Basis für eine generische Modellierung.

Um die Module generisch und einfach anpassbar zu gestalten, gibt es einen grundsätzlichen Funktionsumfang, der für jedes Modul individuell angepasst wird. Diese Grundfunktionen sind in Tabelle 1 dargestellt. In der Modellierung muss jedem Modul zunächst ein Name zugewiesen und der Typ des Moduls (Quelle, Senke, Materialflussbaustein) festgelegt werden. Anschließend muss die Berechnungsvorschrift zur Bestimmung der Bearbeitungszeit eines Elements auf dem Modul angegeben werden. Diese Berechnungsvorschrift entspricht t_{Transfer} der Black Box. Die gesamte Wartezeit eines Auftrages wird erst nach

Bearbeitung des Auftrages bestimmt. Außerdem hat jedes Modul eine Kapazität, die beschreibt wie viele logistische Objekte gleichzeitig bearbeitet bzw. transportiert werden können. Zusätzlich können ein oder mehrere Folgemodule ausgewählt werden. Dies gilt insbesondere für Weichen oder Sortierstationen. Die Angabe der Folgemodule dient der Verknüpfung einzelner Module zu einem Gesamtsystem. Zusätzlich muss auch noch angegeben werden, nach welchen Regeln die Nachfolger auszuwählen sind, d.h. nach welcher Logik Objekte auf die folgenden Module verteilt werden. Auf gleiche Art und Weise werden auch die Vorgänger bestimmt. In Abbildung 1 hat zum Beispiel das Modul B zwei Vorgängermodule. Zum einen das Modul A und zum anderen ein weiteres Modul, welches von unten Objekte an Modul B übergeben kann. In der Regel zur Auswahl des Vorgängermoduls wird definiert ob zum Beispiel logistische Objekte von Modul A kommend immer Vorfahrt vor Objekten von dem anderen Modul haben oder ob abwechselnd Objekte an Modul B übergeben werden können. Wäre der Materialfluss in Abbildung 1 in umgekehrter Richtung, so hätte Modul B zwei Folgemodule. In der Regel würde dann definiert werden, an welches Modul ein Objekt weitergegeben werden soll.

Außerdem besteht die Möglichkeit eine Logik zu starten, die ausgeführt wird sobald ein Objekt ein Modul verlässt. So kann zum Beispiel die Auslagerung einer kompletten Kundenbestellung aus einem Puffer gestartet werden, wenn der letzte fehlende Artikel im Puffer angekommen ist. Dies sind die grundsätzlichen Funktionen aller Module.

Darüber hinaus besitzen Quellen und Senken noch weitere Funktionen, die jedoch nur von diesen Modulararten benötigt werden. Quellen haben grundsätzlich die Funktion Objekte zu erzeugen. Deshalb existiert für den Modultyp Quelle zusätzlich die Möglichkeit, die Art und Weise der Erzeugung von Elementen festzulegen. So kann zum Beispiel bei einer Person-zur-Ware-Kommissionierung in einem Regallager festgelegt werden wie die Kommissionieraufträge zusammengestellt und in welchem Gang sie kommissioniert werden. Im Unterschied dazu wird bei der Ware-zur-Person-Kommissionierung ebenfalls ein Kommissionierauftrag erzeugt, allerdings wird dann der Transport der zu kommissionierenden Artikel zur Kommissionierstation nach einer bestimmten Vorschrift ausgelöst. Module vom Typ Senke besitzen hingegen einen geringeren Umfang als die anderen Module. So ist die Definition eines Folgemoduls und einer Bearbeitungszeit nicht notwendig, da die Senke lediglich das Ende der Simulation beschreibt. Außerdem muss keine Kapazität definiert werden, da unendlich viele Elemente aufgenommen werden können.

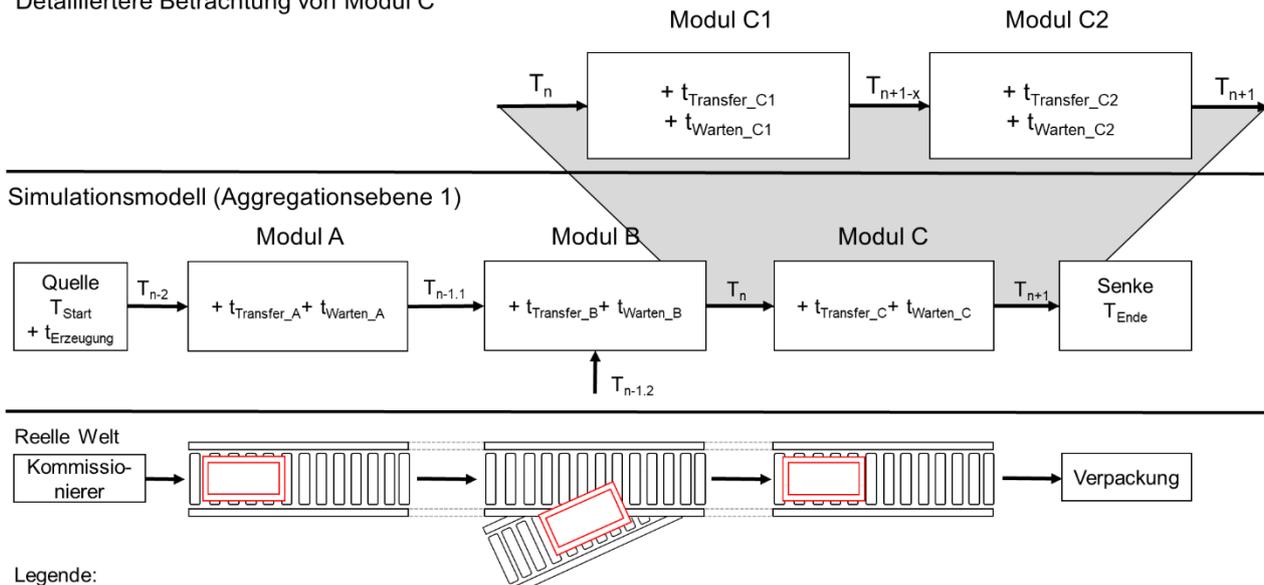
Zusammenfassend führt der Ansatz der generischen Beschreibung von Materialflusselementen zu einer Erhöhung der Modellierungsflexibilität. Nur drei grundsätzliche

Modultypen werden für die Erstellung von Simulationsmodellen benötigt. Die Spezifikation dieser Typen zu genau definierten Materialflusselementen, wie z.B. Rollenförderern oder Kommissionierern, geschieht dann über die Ausformulierung der in Tabelle 1 dargestellten Funktionen. Die Verwendung einer generischen Modellierungsmethodik soll die Erstellung von Simulationsmodellen vereinfachen und damit den Entwicklungsaufwand reduzieren.

Tabelle 1. Grundfunktionen der Module.

Modultyp	Funktion	Beschreibung
Alle	Name	Gibt dem Modul einen eindeutigen Namen
Alle	Typ	Gibt an, ob es sich um eine Quelle, einen Materialflussbaustein oder eine Senke handelt
Quelle, Materialflussbaustein	Berechnungsvorschrift	Bestimmung der Bearbeitungsdauer eines Elements auf dem Modul
Quelle, Materialflussbaustein	Kapazität	Menge der Elemente, die gleichzeitig von einem Modul bearbeitet werden können
Quelle, Materialflussbaustein	Folgemodul	Ein Modul kann nur an die definierten Module ein Element weitergeben
Quelle, Materialflussbaustein	Regel zur Auswahl des Folgemoduls	Bestimmung des Folgemoduls, an das ein Element weitergegeben werden soll
Alle	Regel zur Auswahl des Vorgängermoduls	Bestimmung des Vorgängermoduls, von dem als nächstes ein Element aufgenommen werden soll
Alle	Logik	Erlaubt die Definition von modulübergreifenden oder -internen Prozesse

Simulationsmodell (Aggregationsebene 2)
 Detailliertere Betrachtung von Modul C



Legende:
 T_n : Zeitpunkt
 $t_{Erzeugung}$: Erzeugungsdauer eines Objektes
 $t_{Transfer}$: Transportzeit
 T_{Start} : Erzeugungszeitpunkt eines Objektes
 t_{Warten} : Wartezeit
 T_{Ende} : Beendigungszeitpunkt eine Objektes

Abbildung 2. Beispielhafte Analyse verketteter, automatisierter Materialflusselemente über mehrere Aggregationsebenen.

4.3 SKALIERBARKEIT DES SIMULATIONSMODELLS

Die dritte Säule der progressiven Simulationstheorie ist die Skalierbarkeit des Simulationsmodells. Die Simulation soll in der Lage sein, die Materialflusssimulation auf verschiedenen Aggregationsebenen abzubilden. Eine Aggregationsebene beschreibt dabei den zu simulierenden Prozess auf einer bestimmten Detaillierungsstufe. Ein Beispiel ist in Abbildung 2 dargestellt. Dort ist das in Abbildung 1 bereits verwendete Beispiel auf zwei Aggregationsebenen zu sehen. Auf der Aggregationsebene 1 des Simulationsmodells werden die zeitlichen Zusammenhänge der Module A, B und C des Rollenförderers als Black Boxes dargestellt. Diese Module sind dabei miteinander und mit der Quelle und der Senke vernetzt. Das Ergebnis ist der zeitliche Ablauf des Transportprozesses vom Kommissionierer zum Verpackungsarbeitsplatz. Details dazu wurden auch schon in 4.1 und 4.2 beschrieben. Nun kann auf der Aggregationsebene 2 das Modul C noch detaillierter modelliert und analysiert werden. Dazu wird das Modul C in die Teilmodule C1 und C2 zerlegt. Den Eingang des Moduls C zum Zeitpunkt T_n entspricht dem Eingang des Moduls C1 und der Ausgang des Moduls C zum Zeitpunkt T_{n+1} entspricht dem Ausgang des Moduls C2. Es besteht jetzt aber zusätzlich die Möglichkeit eine Zwischenzeit T_{n+1-x} zwischen den Modulen C1 und C2 zu berechnen und so eine genauere Berechnung der Zeiten zu erhalten. Die progressive Simulationstheorie ist so gestaltet, dass die verschiedenen Aggregationsebenen mit den gleichen generischen Modulen und Strukturen abgebildet werden können. Durch die Aggregation auf eine höhere Ebene muss auch die Berechnung der Ein- und Ausgangszeiten angepasst werden. Auf der Aggregationsebene 1

wurde für jedes Modul die Transfer- und Wartezeit berechnet und addiert. Auf der Aggregationsebene 2 werden Transfer- und Wartezeit nur für die Teilmodule C1 und C2 getrennt berechnet. Die resultierenden Ein- und Ausgangszeiten in Relation zum restlichen Simulationsmodell müssen dabei mit den Zeiten der Aggregationsebene 1 übereinstimmen. Die generischen Module des progressiven Simulationsmodells erlauben die Verwendung der gleichen Modellierung für alle Aggregationsebenen.

Ein besonderes Merkmal bei der Skalierung des Simulationsmodells ist die einfache Wiederverwendung bereits beschriebener Materialflusselemente. Sind erst einmal bestimmte Bausteine der Lager-, Förder-, Kommissionier- und Sortiertechnik beschrieben, so können diese in Bibliotheken abgelegt und leicht wiederverwendet werden. Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, werden die besonderen Funktionalitäten der Materialflusselemente direkt in die Module programmiert. Das hat den Vorteil, dass auf übergreifende Programmlogik verzichtet und so Simulationsmodelle einfach skaliert werden können. So wird die Komplexität reduziert und der Modellierungsaufwand gering gehalten.

5 IMPLEMENTIERUNG

Den Anforderungen an ein progressives Simulationsmodell soll auch in der programmiertechnischen Implementierung Rechnung getragen werden. Um die Modellierung zu erleichtern wurde mit python eine gängige Programmiersprache als Modellsprache gewählt. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in der einfachen Anwendung

durch einen Benutzer mit entsprechenden Programmierkenntnissen [Bos04]. Zudem bietet eine bekannte Programmiersprache die notwendige Flexibilität zur Entwicklung eigener Algorithmen und Strukturen. Eine weitere Maßnahme zur Reduzierung des Modellierungsaufwandes ist der Einsatz einer graphisch-interaktiven Benutzerschnittstelle. Anhand eines einfachen Visualisierungsansatzes erhält der Benutzer die Möglichkeit das zu simulierende Logistiksystem einfach und nachvollziehbar abzubilden. Als Basis für die Visualisierung wurde die Software Microsoft Visio genutzt. Die darin angelegten Simulationsmodelle können einfach in die bestehende Datenbank übertragen werden. Anhand dieser beiden Implementierungsmaßnahmen soll die Modellierung eines Simulationsmodells für den Benutzer vereinfacht werden.

Eine weitere Anforderung an die Implementierung ist die Verarbeitung großer Datenmengen. Die progressive Simulation soll darauf ausgelegt sein, auch große Distributions- und Logistikzentren nachzubilden, möglichst auf der Basis von bereits vorhandenen Daten der Vergangenheit oder von ähnlichen Anlagen. Entsprechende Datenmengen können eine sechsstellige Anzahl von Auftragspositionen umfassen, die schnell importiert und verarbeitet werden müssen. Aus diesem Grund wurde eine SQLite-Datenbank als Grundlage der Simulation verwendet. Diese Datenbank bietet eine gute Anbindung an python und so können einfach große Datenmengen ausgetauscht werden.

6 FAZIT

Der Anspruch der progressiven Simulationsmethode besteht darin ein schnelles und hochwertiges Modellierungs- und Analysewerkzeug für intralogistische Systeme zur Verfügung zu stellen. Diese neue Simulationsmethodik soll den Modellierungs- und Rechenaufwand im Vergleich mit ereignisdiskreten Simulationen reduzieren und dabei gleichzeitig bessere Ergebnisse als ein statisches Simulationsmodell liefern. Um dies zu erreichen, wurde ein Konzept entwickelt, welches sich auf drei Säulen stützt. Erstens wird ein sog. Black-Box-Ansatz verwendet, der die Komplexität einzelner Teilmodule des Logistiksystems reduziert, indem er anhand einer Übertragungsfunktion die Ankunft (Eingangszeitpunkt) und den Abgang (Ausgangszeitpunkt) eines Objekts auf dem Modul berechnet. Zweitens, ein zu simulierendes System wird in verschiedene Bestandteile zerlegt und modelliert, indem nur auf drei generische Modularten (Quelle, Senke und Materialflussbaustein) zurückgegriffen wird. Diese Module können dann einfach und flexibel an die spezifischen Gegebenheiten des jeweiligen logistischen Systems angepasst werden. Dritte Säule ist die Skalierbarkeit der Simulationsmethodik. Damit wird die Fähigkeit beschrieben, das logistische System auf verschiedenen Aggregationsebenen zu modellieren. Je nach Bedarf kann so der Detailgrad der Simulation verändert werden. Um diese drei Säulen praktisch umzusetzen, wird die Modellierung durch ein graphisch-interaktives

Werkzeug unterstützt und das Verhalten anhand der allgemeingültigen Programmiersprache python programmiert. Als Basis kommt eine SQLite-Datenbank zum Einsatz. Das dargestellte Konzept der progressiven Simulation in Kombination mit der entsprechenden Implementierung soll dem Benutzer künftig eine Methodik zur schnellen und hochwertigen Modellierung von Logistiksystemen an die Hand geben.

Im weiteren Verlauf der Entwicklung eines progressiven Simulationsansatzes sind noch weitere Forschungsarbeiten durchzuführen. Zunächst ist die neue Simulationsmethode mit empirischen Daten aus der Praxis zu überprüfen und zu testen. Dazu ist es geplant, zusammen mit Partnerunternehmen logistische Systeme zu simulieren und die Ergebnisse mit Erfahrungen der Partner zu vergleichen. Darüber hinaus wird eine Modulbibliothek angelegt, die verschiedene Module aus Lager-, Kommissionier-, Förder- und Sortiertechnik enthalten soll. Aufbauend auf dieser Bibliothek wird es künftig noch einfacher entsprechende Simulationsmodelle zu erstellen. Mit dem theoretischen Konzept ist bereits der Grundstein für eine neue progressive Simulationsmethodik gelegt.

LITERATUR

- [AA00] Angerhofer, B.J; Angelides, M.C: System dynamics modelling in supply chain management: research review. In: Winter Simulation Conference Proceedings 2000, S. 342–351.
- [Bos04] Bossel, Hartmut (2004): Modellbildung und Simulation. Konzepte, Verfahren und Modelle zum Verhalten dynamischer Systeme. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag.
- [Dek15] Dekkers, Rob (2015): Applied Systems Theory. Cham, S.I.: Springer International Publishing.
- [Ele10] Eley, Michael (2012): Simulation in der Logistik. Einführung in die Erstellung ereignisdiskreter Modelle unter Verwendung des Werkzeuges "Plant Simulation". Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [For91] Forrester, Jay W. (1991): System Dynamics and the Lessons of 35 Years. In: The Systemic Basis of Policy Making in the 1990s. 1. Auflage.
- [Hös01] Höst, Martin; Regnell, Björn; Dag, Johan Natt och; Nedstam, Josef; Nyberg, Christian (2001): Exploring bottlenecks in market-driven requirements management processes with discrete event simulation. In: *Journal of Systems and Software* 59 (3), S. 323–332.
- [JENSY10] Jahangirian, Mohsen; Eldabi, Tillal; Naseer, Aisha; Stergioulas, Lampros K.; Young, Terry (2010): Simulation in manufacturing and business: A review. In: *European Journal of Operational Research* 203 (1), S. 1–13.
- [JK16] Jeon, Su Min; Kim, Gitae (2016): A survey of simulation modeling techniques in production planning and control (PPC). In: *Production Planning & Control*, S. 1–18.
- [MR10] Miyashita, Kazuo; Rajesh, Gautam (2010): Multi-agent coordination for controlling complex and unstable manufacturing processes. In: *Expert Systems with Applications* 37 (3), S. 1836–1845.
- [PFAS99] Pannirselvam, G.; Ferguson, L.; Ash, R.; Siferd, S. (1999): Operations management research: an update for the 1990s. In: *Journal of Operations Management* 18 (1), S. 95–112.
- [VDI14] VDI 3633, Dezember 2014: Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen - Grundlagen.
- [Win17] Winter Simulation Conference Archive (2017). <http://informs-sim.org/> (abgerufen am 25.07.2017).

Svenja Hilbrich, M.Sc. in Physik, ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg. Svenja Hilbrich studierte bis 2015 Physik im Bachelor und Master an der Technischen Universität Dortmund.

Dipl.-Ing. Harald Köck ist Produktmanager in der Abteilung Standard Lösungen und Systeme der Firma SSI Schäfer Automation GmbH. Nach dem Abschluss der HTL in Maschinenbau und dem Studium Telematik (Information and Computer Engineering) an der Technischen Universität Graz arbeitete Harald Köck als Solution Architect und Produktmanager im Bereich Telekommunikation-Carrier und danach in den Bereichen Intralogistik und Supply-Chain-Management.

Dr. Johannes Hinckeldeyn, ist Oberingenieur am Institut für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg. Nach seiner Promotion in Großbritannien war Johannes Hinckeldeyn als Chief Operating Officer für einen Hersteller von Mess- und Labortechnik für die Batterieforschung tätig. Johannes Hinckeldeyn studierte Wirtschaftsingenieurwesen, Produktionstechnik und –management in Hamburg und Münster.

Prof. Dr.-Ing. Jochen Kreutzfeldt, ist Professor und Leiter des Instituts für Technische Logistik der Technischen Universität Hamburg. Nach seinem Maschinenbaustudium mit der Vertiefung Produktionstechnik war Jochen Kreutzfeldt in verschiedenen leitenden Positionen bei einem Unternehmen für Automobilsicherheitstechnik tätig. Anschließend übernahm Jochen Kreutzfeldt eine Professur für Logistik an der Hochschule für Angewandte Wissenschaft Hamburg und wurde Leiter des Instituts für Produkt- und Produktionsmanagement.

Adresse: Institut für Technische Logistik, Technische Universität Hamburg, Theodor-Yorck-Straße 8, 21079 Hamburg, Deutschland, Telefon: +49 40 42878-4893, E-Mail: svenja.hilbrich@tuhh.de